

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sungai

Menurut Moerwanto (1980), sungai dapat diartikan suatu pengaliran air yang berada disuatu alur yang dibatasi oleh tebing-tebingnya. Sungai tidak hanya mengalirkan air saja ke laut, tetapi juga sedimen. Hal yang menarik ialah bahwa butiran sedimen (*particles*) terjadi dilepaskan atau dilonggarkan oleh hujan, selanjutnya dibawa ke sungai melewati anak sungai yang kecil menuju ke laut, yang tidak diketahui oleh orang yang bukan ahli.

2.2 Sedimentasi

Menurut Soemarto (1987), sedimentasi dapat didefinisikan sebagai proses pengangkutan atau melayang (*suspensi*) atau mengendapnya material fragmental oleh air. Sebagian besar sedimen dialirkan oleh sungai-sungai yang mengalir ke waduk, dan hanya sebagian kecil yang berasal dari longsoran tebing-tebing waduk, atau berasal dari longsoran tebing-tebingnya oleh limpasan permukaan.

Takeda dkk (2016) menyebutkan beberapa faktor yang dapat mempengaruhi proses sedimentasi di daerah pengaliran sungai. Salah satu faktornya adalah karakteristik hidrolika sungai. Intensitas penggerusan tebing sungai dan kapasitas transportasi sedimen dipengaruhi oleh karakteristik hidrolika dari sungai yang bersangkutan, yaitu debit sungai, kecepatan aliran air sungai, konfigurasi alur sungai, bentuk penampang lintang sungai, kemiringannya dan kekasaran dari batuan pembentuk alur sungai. Kekasaran tersebut biasanya

tergantung dari tekstur batuan, konfigurasi alur sungai dan vegetasi yang terdapat pada alur sungai tersebut.

Menurut Yang (1996) adanya bendungan dan *reservoir* (contoh: waduk dan kolam retensi) dapat memberikan pengaruh yang signifikan terhadap aliran air maupun sedimen yang berada di sungai. Hal ini juga dapat menimbulkan efek jangka panjang yaitu dapat merubah bentuk morfologi sungai.

Angkutan sedimen secara umum dapat dibedakan dalam 3 macam (Moerwanto, 1980):

1. Muatan Kikisan (*wash load*)

Terdiri dari partikel-partikel yang kecil, berada di sungai bersama air dan terangkat dalam suspensi. Muatan kikisan secara umum tidak mempengaruhi morfologi sungai, karena partikelnya menetap; karenanya *wash load* atau muatan kikisan tidak dapat diperhitungkan sebagai fungsi dari suatu aliran. Dan untuknya apabila jumlah muatan kikisan sangat menentukan maka pengukuran perlu diadakan (dengan pengambilan contoh/ sampel).

2. Muatan Melayang (*suspended load*)

Terdiri dari partikel yang terangkut dalam suspensi dan dalam arti yang sempit, partikel dasar yang terangkut dalam suspensi dapat dipandang sebagai muatan melayang.

3. Muatan Dasar (*bed load*)

Terdiri dari partikel yang bergeser dan menggelundung diatas dasar. Tidak terdapat perbedaan yang nyata antara muatan dasar dan muatan melayang. Partikel yang terangkut sebagai muatan dasar pada suatu saat dapat terangkut

sebagai muatan melayang. Oleh karenanya muatan dasar bersama-sama muatan melayang dinamakan muatan dasar sedimen (*bed material load*).

2.3 Transpor Sedimen

Mardijkoen (1987) menyatakan sangat penting untuk mempelajari transpor sedimen, khususnya dikaitkan dengan berbagai aspek Teknik Hidro sebagai berikut.

1. Hidraulika Fluvial: pengetahuan transpor sedimen merupakan dasar untuk perancangan bangunan pengendalian sungai, perbaikan navigasi, pengendalian banjir dan lain-lain.
2. Irigasi: perancangan saluran stabil, pintu pengambilan, bangunan pengendap dan lain-lain.
3. Teknik pantai: ramalan *littorial drift*, perancangan bangunan pelindung pantai, pelabuhan dan lain-lain.
4. Pengerukan: penyedotan, transportasi dan pembuangan material hasil kerukan.

Dalam kaitannya proses transpor sedimen dapat menyebabkan terjadi aggradasi dan degradasi sungai. Menurut Mardijkoen (1987), aggradasi dasar permukaan sungai terjadi karena transpor sedimen yang keluar lebih sedikit dibandingkan transpor sedimen yang masuk. Degradasi dasar permukaan sungai terjadi apabila transpor sedimen yang keluar lebih banyak daripada transpor sedimen yang masuk. Apabila transpor sedimen terjadi secara seimbang antara keluar dan masuk maka dasar permukaan sungai akan stabil. Kaitan antara transpor sedimen dapat menyebabkan aggradasi dan degradasi dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Perbandingan Pengaruh Antara Sedimen Keluar dan Masuk
(Mardjikoen, 1987)

Perbandingan Transpor Sedimen	Proses	
	Sedimen	Dasar
$G_1 = G_2$	seimbang	stabil
$G_1 < G_2$	erosi	degradasi
$G_1 > G_2$	pengendapan	agradasi

2.4 Kali Belik

Menurut Sulaiman, Sungai Belik atau juga biasa disebut Kali Belik memiliki beberapa nama lain yaitu Sungai Mambu dan Sungai Manunggal. Kali Belik berada di antara dua sungai yaitu Sungai Code di sebelah barat, dan Sungai Gajahwong di sebelah timur. Kali Belik merupakan anak sungai dari Sungai Gajahwong yang berhulu di Karangasem dan mengalir melalui lembah UGM ke arah selatan melewati Sagan dan terus ke selatan melalui gorong-gorong yang terletak di Jalan Solo dan akan berhilir di Wonokromo. Kali Belik melewati 3 wilayah administrasi yaitu Kabupaten Sleman, Kota Yogyakarta dan Kabupaten Bantul (Ma'Aliy, 2016).

2.5 Program HEC-RAS versi 4.1.0

Menurut Istiarto (2014), HEC-RAS merupakan program yang dapat memodelkan aliran di sungai. *River Analysis System* (RAS) yang dikembangkan oleh *Hydrolic Engineering Center* (HEC) yang masih satu divisi dengan *Institute of Water Resources* (IWR) dibawah naungan *US Army Corps Of Engineer*. HEC-RAS versi 4.1.0 yang mulai diedarkan pada Januari 2010 ini, memiliki beberapa komponen analisis permodelan satu dimensi, diantaranya perhitungan aliran permanen, aliran tak permanen, transpor sedimen, dan kualitas air.

Analisis hidrolika bagian modul transpor sedimen dirancang untuk mensimulasikan gerusan dan deposisi pada sungai yang diakibatkan oleh frekuensi dan durasi debit sungai, dan perubahan geometri sungai. Modul ini juga dapat memperkirakan sedimentasi pada reservoir dan mengkaji sedimentasi pada saluran.

2.6 Analisis Transpor Sedimen

Dalam Brunner (2010), analisa transpor sedimen pada HEC-RAS versi 4.1.0, terdapat faktor-faktor yang digunakan dalam analisis transpor sedimen.

2.6.1 Kekasaran Saluran

Persamaan yang digunakan yaitu persamaan kekasaran Manning. Persamaan kekasaran Manning dapat dilihat pada persamaan 2.1. Tabel kekasaran Manning dari Chow (1959) dapat dilihat pada Lampiran 3.

$$U = \frac{1}{n} Rh^{\frac{2}{3}} Se^{\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

Keterangan:

U : Kecepatan aliran (m^3/s)
 n : Koefisien Manning
 Rh : Radius hidraulik (m)
 Se : Kemiringan saluran

2.6.2 Fall Velocity Method (Kecepatan Jatuh)

Brunner (2010) memaparkan terdapat 3 metode kecepatan jatuh dalam HEC-RAS versi 4.1.0 yaitu Toffaleti (1968), Van Rijn (1993), dan Rubey (1933).

a) Toffaleti

Toffaleti menyajikan tabel dalam analisis kecepatan jatuh sedimen. Toffaleti menetapkan *shape factor* (sf) 0,9 dan *specific gravity* 2,65. Kecepatan jatuh dipilih berdasarkan temperatur air dan ukuran sedimen. Kecepatan jatuh Toffaleti dapat dilihat dalam Gambar 2.2.

b) Van Rijn

Dalam persamaan kecepatan jatuh menurut Van Rijn, digunakan *shape factor* 0,7 dan temperatur 20°C. Van Rijn memaparkan 3 persamaan tergantung ukuran sedimen.

$$\omega = (s - 1)gd/18\nu \quad 0.001 < d \leq 0.1 \text{ mm} \quad (2.2)$$

$$\omega = \frac{10\nu}{d} \left[\left(1 + \frac{0.01(s-1)gd^3}{\nu^2} \right)^{0.5} - 1 \right] \quad 0.1 < d < 1 \text{ mm} \quad (2.3)$$

$$\omega = 1.1 [(s - 1)gd]^{0.5} \quad d \geq 1 \text{ mm} \quad (2.4)$$

Keterangan:

ω : Kecepatan jatuh partikel
 ν : Viskositas kinematis
 s : Spesifik gravitasi partikel
 d : Diameter partikel

c) Rubey

Dalam persamaan kecepatan jatuh, Rubey menyarankan *specific gravity* 2,65 dan menetapkan persamaannya untuk temperatur 16°C. Persamaan kecepatan jatuh Rubey memadai untuk butir pasir, lanau dan kerikil. Persamaan jatuh Rubey dapat dilihat pada persamaan 2.5.

$$\omega = F1 \sqrt{(s - 1)gd_s} \quad (2.5)$$

Dimana,

$$F1 = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu}{gd^3(s-1)}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{gd^3(s-1)}} \quad (2.6)$$

2.6.3 *Sorting Method*

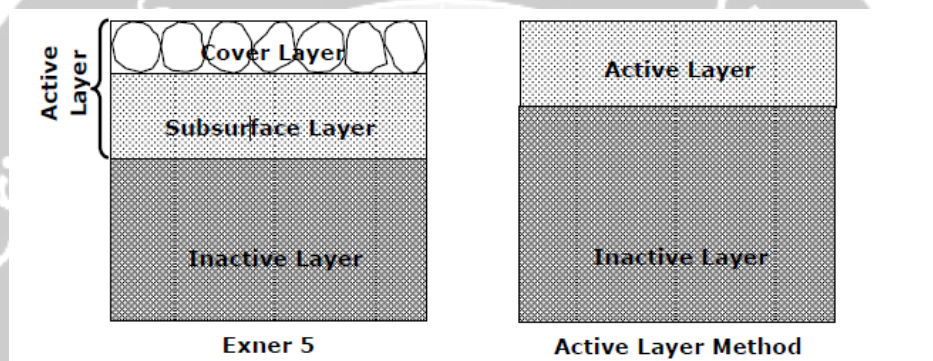
Terdapat 2 metode dalam *sorting method* pada HEC-RAS versi 4.1.0 untuk mendefinisikan asumsi layer aktif pada dasar saluran. Gambar 2.1 merupakan perbedaan antara 2 metode dalam *sorting method* pada HEC-RAS versi 4.1.0.

a) Metode Exner 5

Mendefinisikan 3 lapisan pada dasar saluran. Menyebutkan bahwa material kasar sebagai *cover layer* pada dasar saluran.

b) *Active Layer Method*

Mendefinisikan 2 lapisan aktif dan tidak aktif pada dasar saluran. Metode ini dimaksudkan untuk persamaan transpor sedimen Wilcock.



Gambar 2.1 Perbedaan *Sorting Method Exner 5* dan *Active Layer Method* (Sumber: *Hydraulic Reference Manual*)

2.6.4 Persamaan Transpor Sedimen pada HEC-RAS versi 4.1.0

a) Persamaan Ackers-White

$$X = \frac{G_{gr} s d_s}{D \left(\frac{u_*}{V} \right)^n} \quad \text{dan} \quad G_{gr} = C \left(\frac{F_{gr}}{A} - 1 \right) \quad (2.7)$$

Keterangan:

X	: Konsentrasi sedimen
G_{gr}	: Parameter transpor sedimen
s	: Gravitasi spesifik pada sedimen
d_s	: Diameter rata-rata partikel
D	: Kedalaman efektif
u^*	: Kecepatan geser
V	: Kecepatan rata-rata pada saluran
n	: Transisi eksponen, tergantung ukuran sedimen
C	: Koefisien
F_{gr}	: Parameter mobilitas sedimen
A	: Parameter mobilitas sedimen kritis

b) Persamaan Engelund-Hansen

$$g_s = 0.05 \gamma_s V^2 \sqrt{\frac{d_{50}}{g \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)}} \left[\frac{\tau_o}{(\gamma_s - \gamma) d_{50}} \right]^{3/2} \quad (2.8)$$

Keterangan:

g_s : Transpor sedimen unit
 γ : Berat unit air
 γ_s : Berat unit partikel padat
 V : Kecepatan rata-rata pada saluran
 τ_o : Tegangan geser pada dasar saluran
 d_{50} : Ukuran saringan yang dapat dilewati 50% dari berat sedimen

c) Persamaan Laursen

$$C_m = 0,01 \gamma \left(\frac{d_s}{D} \right)^{7/6} \left(\frac{\tau_o}{\tau_c} - 1 \right) f \left(\frac{u^*}{\omega} \right) \quad (2.9)$$

Keterangan:

C_m : Konsentrasi sedimen, dalam satuan berat/volume
 G : Berat unit air
 d_s : Diameter rata-rata partikel
 D : Kedalaman efektif
 τ_o : Tegangan geser pada dasar
 τ_c : Tegangan geser kritis pada dasar
 $f \left(\frac{u^*}{\omega} \right)$: Persamaan rasio antara kecepatan geser dan kecepatan jatuh
 (Laursen, 1958)

d) Meyer-Peter Muller

$$\left(\frac{k_r}{k_{r'}} \right)^{3/2} \gamma R S = 0,047 (\gamma_s - \gamma) d_m + 0,25 \left(\frac{\gamma}{g} \right)^{1/3} \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s} \right)^{2/3} g_s^{2/3} \quad (2.10)$$

Keterangan:

g_s : Transpor sedimen unit, dalam berat/waktu/lebar unit
 k_r : Koefisien kekasaran
 $k_{r'}$: Koefisien kekasaran berdasarkan butiran
 γ : Berat unit air
 γ_s : Berat unit sedimen
 g : Gravitasi
 d_m : Median diameter partikel
 R : Jari-jari hidraulik
 S : Gradien energi

e) Persamaan Toffaleti

Lower zone:

$$g_{ssL} = M \frac{\left(\frac{R}{11,24}\right)^{1+n_v-0,756z} - (2d_m)^{1+n_v-0,756z}}{1+n_v-0,756z} \quad (2.11)$$

Middle zone:

$$g_{ssM} = M \frac{\left(\frac{R}{11,24}\right)^{0,244z} \left[\left(\frac{R}{2,5}\right)^{1+n_v-z} - \left(\frac{R}{11,24}\right)^{1+n_v-z} \right]}{1+n_v-z} \quad (2.12)$$

Upper zone:

$$g_{ssU} = M \frac{\left(\frac{R}{11,24}\right)^{0,244z} \left(\frac{R}{2,5}\right)^{0,5z} \left[R^{1+n_v-1,5z} - \left(\frac{R}{11,24}\right)^{1+n_v-1,5z} \right]}{1+n_v-1,5z} \quad (2.13)$$

Bed zone:

$$g_{sb} = M(2d_m)^{1+n_v-0,756z} \quad (2.14)$$

Parameter konsentrasi sedimen:

$$M = 43,2C_L(1+n_v)VR^{0,756z-n_v} \quad (2.15)$$

Total Sedimen:

$$g_s = g_{ssL} + g_{ssM} + g_{ssU} + g_{sb} \quad (2.16)$$

Keterangan:

- g_{ssL} : Transpor sedimen yang berada di *lower zone*, dalam tons/day/ft
 g_{ssM} : Transpor sedimen yang berada di *medium zone*, dalam tons/day/ft
 g_{ssU} : Transpor sedimen yang berada di *upper zone*, dalam tons/day/ft
 g_{sb} : Transpor sedimen yang berada di *bed zone*, dalam tons/day/ft
 g_s : Total transpor sedimen, dalam tons/day/ft
 M : Parameter konsentrasi sedimen
 C_L : Konsentrasi sedimen pada *lower zone*
 R : Jari-jari hidraulik
 d_m : Median diameter partikel

- z : Exponen yang mendeskripsikan hubungan antara sedimen dan karakteristik hidrolika
 n_v : Temperatur exponen

f) Persamaan Yang

Untuk pasir $d_m < 2$ mm:

$$\log C_t = 5,435 - 0,286 \log \frac{\omega d_m}{v} - 0,457 \log \frac{u^*}{\omega} + \left(1,799 - 0,409 \log \frac{\omega d_m}{v} - 0,314 \log \frac{u^*}{\omega} \right) \log \left(\frac{VS}{\omega} - \frac{V_{CRS}}{\omega} \right) \quad (2.17)$$

Untuk kerikil $d_m > 2$ mm:

$$\log C_t = 6,681 - 0,633 \log \frac{\omega d_m}{v} - 4,816 \log \frac{u^*}{\omega} + \left(2,784 - 0,305 \log \frac{\omega d_m}{v} - 0,282 \log \frac{u^*}{\omega} \right) \log \left(\frac{VS}{\omega} - \frac{V_{CRS}}{\omega} \right) \quad (2.18)$$

Keterangan:

- C_t : Konsentrasi total sedimen
 ω : Kecepatan jatuh partikel
 d_m : Median diameter partikel
 v : Viskositas
 u^* : Kecepatan geser
 V : Kecepatan rata-rata saluran
 S : Gradien energi

2.7 Perbandingan dan Evaluasi Teori Transpor Sedimen

Metode perhitungan transpor sedimen sangat beragam, para ahli telah menganalisis perbandingan antar metode transpor sedimen berdasarkan berbagai faktor. Salah satunya perbandingan metode transpor sedimen berdasarkan ukuran partikel sedimen. Menurut Yang (1996), analisis distribusi berdasarkan partikel transpor sedimen sangatlah penting untuk perhitungan distribusi sedimentasi pada reservoir dan teknik sungai.

Begitu banyaknya persamaan transpor sedimen dan tidak ada persamaan yang secara sempurna dan pasti dapat dipilih dan digunakan. Munculnya beberapa faktor

seperti gradasi dan bentuk faktor sedimen, presentase permukaan dasar yang terdapat material kasar, temperatur air dll. Yang (1996) telah menjabarkan bagaimana memilih rumus transpor sedimen berdasarkan beberapa faktor. Berikut ini prosedur yang direkomendasikan oleh Yang (1977,1980) dalam Yang (1996) dengan sedikit perubahan.

1. Tentukan data lapangan yang tersedia dan terukur.
2. Periksa semua rumus dan pilih sesuai data yang berhubungan dengan langkah 1.
3. Bandingkan kondisi lapangan dan batas rumus yang dipilih pada langkah 2. Jika dapat digunakan lebih dari 1 rumus, hitung transpor sedimen menggunakan rumus-rumus tersebut dan bandingkan hasilnya.
4. Pilih rumus yang digunakan untuk menghitung muatan sedimen dan memperkirakan laju transpor sedimen pada kondisi debit tersebut ketika pengukuran aktual tidak tersedia.
5. Jika tidak ada muatan sedimen untuk perbandingan, berikut prosedur yang dapat dipertimbangkan:
 - 1) Gunakan persamaan Meyer-Peter dan Muller ketika material dasar lebih kasar dari 5mm,
 - 2) Gunakan prosedur Einstein ketika dasar muatan mendominasi total muatan,
 - 3) Gunakan persamaan Toffaleti untuk dasar sungai berpasir,
 - 4) Gunakan persamaan Yang (1973) untuk analisis transpor pasir dengan *flume* laboratorium dan sungai alami. Gunakan rumus Yang

(1979) untuk transpor pasir ketika kekuatan aliran kritis pada gerakan yang baru terjadi dapat diabaikan,

- 5) Gunakan persamaan Yang (1984) untuk material dasar berkerikil,
- 6) Gunakan persamaan Yang (1996) untuk material halus yang mendominasi,
- 7) Gunakan persamaan Ackers dan White atau Engelund dan Hansen untuk kondisi aliran subkritis,
- 8) Gunakan persamaan Laursen untuk percobaan *flume* di laboratorium dan sungai yang dangkal dengan material dasar pasir halus dan lanau kasar,
- 9) Gunakan persamaan Meyer-Peter dan Muller untuk *bed load* dan rumus Einstein yang sudah dimodifikasi untuk *suspended load* untuk memperoleh *total load*,
- 10) Pilih persamaan transpor sedimen berdasarkan derajat akurasi pada Tabel 2.2.
- 11) Berdasarkan analisis Yang dan Wan (1991), pilih persamaan yang paling akurat menurut data debit dan kondisi sedimen yang diberikan.

Studi tentang perbandingan persamaan sedimen juga telah dipaparkan dalam SAM User's Manual (*Waterways Experiment Station*, 1998). Perbandingan berdasarkan beberapa parameter salah satunya ukuran butiran sedimen. Studi perbandingan persamaan sedimen berdasarkan parameter sedimen ditampilkan dalam Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Jangkauan Nilai Masukan Untuk Persamaan Transpor Sedimen
(Brunner, 2010)

Persamaan	d	d _m	s	U	y	Se	Bo	T
Ackers-White (flume)	0,04 – 7,0	NA	1,0 – 2,7	0,07 – 7,1	0,01 – 1,4	0,00006 – 0,037	0,23 – 4,0	46 – 89
Englund-Handsen (flume)	NA (<i>not available</i>)	0,19 – 0,93	NA	0,65 – 6,34	0,19 – 1,33	0,000055 – 0,019	NA	45 – 93
Laursen (field)	NA	0,08	NA	0,068 – 7,8	0,67 – 54	0,0000021 – 0,0018	63 – 3640	32 – 93
Laursen (flume)	NA	0,7	NA	0,7 – 9,4	0,03 – 3,6	0,00025 – 0,025	0,25 – 6,6	46 – 83
Meyer-Peter Muller (flume)	0,4 – 29	0,011 – 29	1,25 – 4,0	1,2 – 9,4	0,03 – 3,9	0,0004 – 0,02	0,5 – 6,6	NA
Tofaletti (field)	0,062 – 4,0	0,095 – 0,76	NA	0,7 – 7,8	0,07 – 56,7 (R)	0,000002 – 0,011	63 – 3640	32 – 93
Tofalletti (flume)	0,062 – 4,0	0,45 – 0,91	NA	0,7 – 6,3	0,07 – 1,1 (R)	0,00014 – 0,019	0,8 – 8	40 – 93
Yang (field-sand)	0,15 – 1,7	NA	NA	0,8 – 6,4	0,04 – 50	0,000043 – 0,0028	0,44 – 1750	32 – 94

Keterangan:

- d = Diameter partikel secara keseluruhan, mm
 y = Kedalaman saluran, ft
 Se = Kemiringan saluran
 (Rh) = Radius hidraulik
 Bo = Lebar saluran, ft
 dm = Median partikel sedimen, mm
 T = Suhu air, °F
 SG = Kerapatan relatif (*specific gravity*) sedimen
 U = Rata – rata kecepatan saluran, fps

